Iranian Journal of
Crystallography
and Mineralogy

OPEN ACCESS JOURNAL

مقاله پژوهشی

مجله بلورشناسی وکانی شناسی ایران
سال سی و دوم، شمارهٔ دوم، تابستان ۱۴۰۳، از صفحهٔ ۳۰۱ تا ۳۱۲

مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران

تعیین خاستگاه کانه‌زایی اورانیوم در کانسار ناهنجاری ۲ ساغند بر پایه زمین شیمی عناصر خاکی نادر در کانی اورانینیت، ایران مرکزی

خالق خشنودی[۱]، سیده فرناز میری الموتی*[۲]، محمد یزدی[۲]

۱- پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، ایران
۲- گروه زمین‌شناسی منابع معدنی و آب، دانشگاه شهید بهشتی، ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۵/۳۰، نسخه نهایی: ۱۴۰۲/۹/۲۱)

چکیده: ناهنجاری ۲ ساغند در ۱۸۰ کیلومتری شمال شرق استان یزد و به فاصله ۴۰ کیلومتری شرق روستا ساغند و در شرق کوه تاشک قرار دارد. این منطقه بخشی از پهنه فلززایی بافق-ساغند در خرده قاره ایران مرکزی است. واحد آتشفشانی-رسوبی کامبرین پیشین شامل سنگ‌های آتشفشانی حدواسط تا اسیدی، آهک دولومیتی و مقادیر کمی لایه‌های سنگ گچ میزبان کانه‌زایی آهن-اورانیوم در منطقه ساغند است. اورانینیت کانی اصلی میزبان اورانیوم بوده و با مگنتیت و پیریت همراه است. مولیبدنیت نیز به‌صورت جزئی در برخی از پهنه‌های کانی‌سازی حضور دارد. کانه‌زایی‌های آهن و اورانیوم در دو مرحله جدا انجام شده‌اند. مگنتیت و پیریت‌های درشت‌دانه مربوط به مرحله کانه‌زایی آهن و نوع ریزدانه آن‌ها مربوط به مرحله کانه‌زایی اورانیوم هستند. عیار اورانیوم در نمونه‌های تجزیه شده از ۱۳۶۵ تا ۴۷۶۴ ppm تغییر می‌کند. همچنین Ce، Fe، Hf، Nb، S، Sc، Ta، W، Yb و Zr دارای توزیع غیرعادی هستند و بیشترین گستره تغییرات مربوط به عناصر Fe و S است. عناصر اصلی و خاکی نادر را با توجه به همراهی با اورانیوم می‌توان به دو دسته تقسیم کرد. دسته اول شامل S، Fe، Ce، Dy، Er و Gd است که با اورانیوم ضریب همبستگی مثبت دارند و در شرایط یکسان با آن نهشته شده‌اند. دسته دوم شامل Hf، Ti و Nb است که با اورانیوم ضریب همبستگی منفی دارند و به نظر می‌رسد که در شرایط متفاوتی نهشته شده‌اند. در نمودار الگوی توزیع عناصر خاکی نادر بهنجار شده نسبت به کندریت، Eu و Pr تهی‌شدگی و Ce و Sm غنی‌شدگی نشان می‌دهند. ترکیب شیمیایی اورانینیت و تشابه الگوی توزیع عناصر خاکی نادر در اورانینیت ناهنجاری ۲ ساغند با ذخایر دگرنهادی نشان می‌دهد که کانه‌زایی اورانیوم در این منطقه از نوع دگرنهادیی بوده و دمای تشکیل آن براساس ترکیب شیمیایی و الگوی توزیع عناصر خاکی نادر در اورانینیت بین ۲۰۰ تا ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد است.

واژه‌های کلیدی: *اورانینیت؛ عناصر خاکی نادر؛ ناهنجاری ۲ ساغند؛ ایران مرکزی.*

مقدمه

عناصر خاکی نادر (REE) با صدها کاربرد متنوع، بنیان اصلی گسترش فناوری‌های پیشرفته و راهبردی به ویژه در دو دهه گذشته بوده‌اند. استفاده در فناوری‌های مدرن چون هوافضا، لیزرهای پرقدرت، پزشکی، فناوری هسته‌ای، آلیاژهای ویژه، کاتالیزورها، فناوری‌های دوستدار محیط زیست از جمله خودروهای دوگانه، صنایع الکترونیک، آهن‌رباهای دائمی، باتری‌های قابل شارژ، صنایع شیشه و سرامیک و ده‌ها فناوری حساس دیگر سبب شده است که این عناصر به‌عنوان "فلزهای راهبردی" شناخته شوند [۱]. گسترش روزافزون صنایع پیشرفته و ناممکن بودن جایگزینی این فلزها با دیگر عناصر، موجب افزایش قابل توجه تقاضا برای این مجموعه از عناصر شده است. از سویی، با توجه به محدود بودن منابع جهانی و انحصاری بودن بازار این فلزها برای چند کشور از جمله چین و ایالات متحده آمریکا، سرمایه‌گذاری ویژه برای شناسایی منابع و ذخایر زمین‌شناسی جدید در عرصه جهانی در سال‌های اخیر

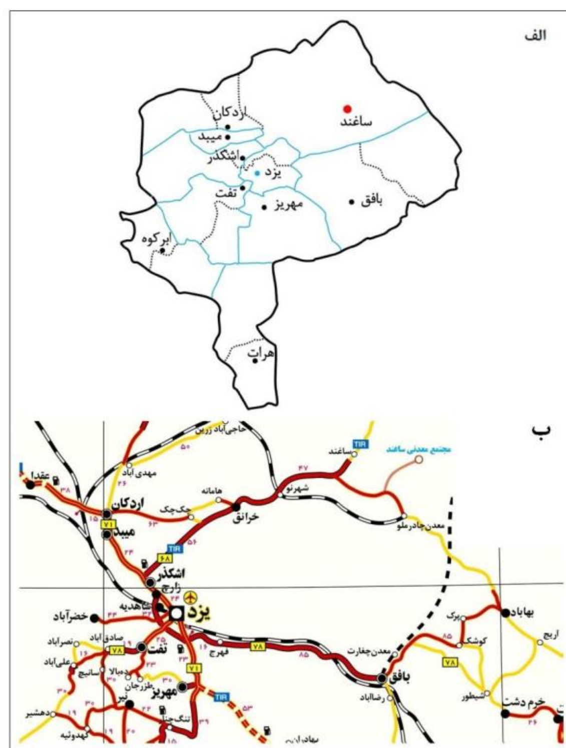
*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۱۹۹۷۹۹۴۱۴، پست الکترونیکی: Farnazmiri31@gmail.com

[DOI: 10.61186/ijcm.32.2.301]

افزایش چشم‌گیری داشته است. همچنین امروزه برداشت این عناصر در کنار سایر عناصر همراه (به‌صورت فراورده جانبی یا اصلی) بسیار مورد توجه است. انحصاری بودن تولید این عناصر برای چند کشور و پیش‌بینی افزایش تقاضا برای آنها موجب نگرانی‌های گسترده‌ای در مورد امنیت تأمین این عناصر در عرصه جهانی شده است تا جایی که برخی از این عناصر با نام "عناصر بحرانی" معرفی شده‌اند [۲].

از سویی، رویدادهای دراز مدت، چون افزایش جمعیت جهانی و رشد اقتصادی پیش‌بینی شده، تقاضای جهانی برای منابع انرژی را افزایش داده است. بر اساس گزارش "چشم‌انداز انرژی جهان" توسط آژانس بین‌المللی انرژی در سال ۲۰۰۷، پیش‌بینی شده است که با فرض این که دولت‌های جهان سیاست‌های جاری انرژی را حفظ کنند، نیازهای اولیه انرژی جهان با ۵۵ درصد رشد بین سال‌های ۲۰۰۵ و ۲۰۳۰ به آهنگ رشد میانگین سالیانه ۱٫۸ درصد برسد. منابع برآورد زده شده برای تولید برق با زغال سنگ (۳۹ درصد)، گاز (۲۰ درصد)، آب (۱۶ درصد)، انرژی هسته‌ای (۱۶ درصد)، نفت (۷ درصد) و منابع تجدید پذیر دیگر (۷ درصد) ممکن است پاسخگوی افزایش نیاز انرژی در آینده نباشند. تمایل بسیاری از دولت‌ها به تولید انرژی برق ایمن بدون انتشار گازهای گلخانه‌ای با نیروی هسته‌ای، دورنمای رشد انرژی هسته‌ای را افزایش داده است. پیاده سازی انرژی هسته‌ای به چرخه سوخت هسته‌ای و اطمینان از وجود منابع مواد خام آن گره خورده است. رادیونوکلئیدهای طبیعی اورانیوم و توریم می‌توانند در تأسیسات انرژی هسته‌ای برای تولید برق، مواد مورد نیاز در صنایع داروسازی و پزشکی، کشاورزی و غیره استفاده شوند. بیشتر تأسیسات هسته‌ای از اورانیوم به‌عنوان سوخت هسته‌ای استفاده می‌کنند، اما به هرحال برای سایر فناوری‌های گسترش یافته منابع دیگری از جمله توریم نیز می‌توانند استفاده شوند [۱-۳].

گستره پرتوزای ساغند بخشی از پهنه فلززایی زرند- بافق- پشت بادام در قطعه پشت بادام است که ناحیه‌ای به مساحت ۱۸۱۰۰ کیلومتر مربع بین شهر زرند و آبادی پشت بادام را در برمی‌گیرد و از جنوب شرق به طول بیش از ۴۰۰ کیلومتر به سمت شمال غرب گسترش دارد و عرض آن حدود ۱۰۰ کیلومتر است. این منطقه در ۴۰ کیلومتری شرق دهکده ساغند، در شمال شرق استان یزد واقع است. معدن ۲ ساغند در ۱۸۰ کیلومتری شمال شرق یزد بین طول‌های جغرافیایی ۳۶۷۹۵۰ تا ۳۶۹۳۵۰ و عرض‌های جغرافیایی۳۵۹۸۰۰ تا ۳۵۹۷۴۰۰ قرار دارد (شکل ۱).



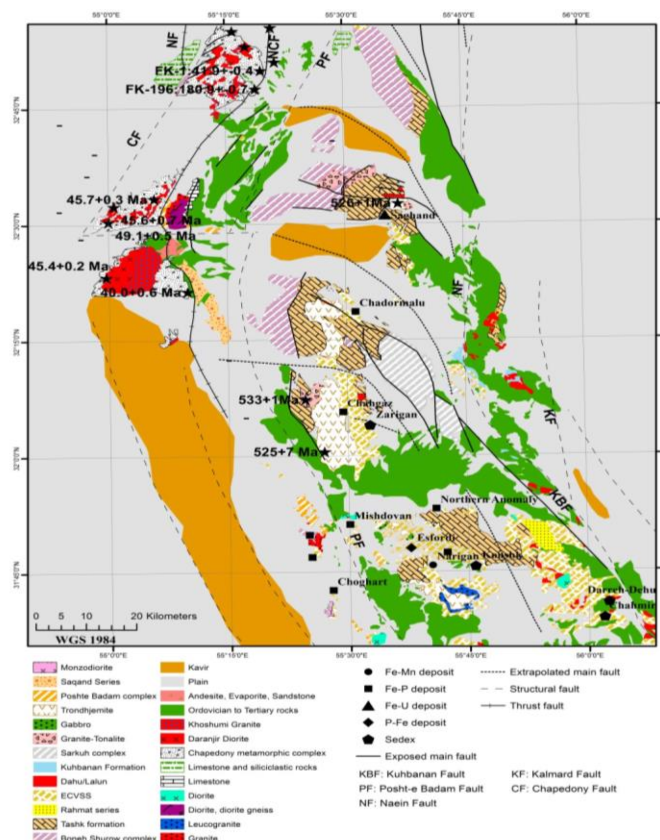
شکل ۱ الف) نقشه شهرستان‌های استان یزد و موقعیت منطقه مورد بررسی، ب) راه‌های دسترسی به منطقه مورد بررسی.

[DOI: 10.61186/ijcm.32.2.301]

همه معادن و ناهنجاری‌های کشف شده در گستره معدنی ساغند در ارتباط با فرآیندهای دگرنهادی هستند [۴-۶]. بررسی‌های زمین‌شناسی اقتصادی کانسار اورانیوم ناهنجاری ۲ ساغند از زمان پی جویی تاکنون تنها توسط موسسه تحقیقاتی بیجینگ (Beijing) چین در سال ۱۹۹۲ انجام شده است. براساس گزارش آنها، کانی‌های اصلی اورانیوم در این کانسار اورانینیت و به مقدار کمتر کلوئیت (اورانینیت دارای بیش از ۱۰ درصد عناصر خاکی نادر هستند) و خاستگاه کانسار، دگرنهادی معرفی شده است [۷]. در این پژوهش، خاستگاه کانسار اورانیوم ناهنجاری ۲ ساغند با بررسی زمین شیمی عناصر خاکی نادر در اورانینیت‌ها تعیین شده است.

زمین‌شناسی منطقه

ناهنجاری دو ساغند در پهنه زمین ساختی- ماگمایی کاشمر- کرمان در قطعه پشت بادام و در خرده قاره ایران مرکزی واقع است (شکل ۲) [۴]. این ناهنجاری از غرب به سازندهای تاشک و از شرق به واحدهای آتشفشانی- رسوبی کامبرین محدود است. سازند تاشک در غرب منطقه مورد بررسی از سنگ‌های دگرگونی در حد رخساره شیست سبز شبیه فلیش‌های تناوبی و تخریبی شامل فیلیت، اسلیت، ماسه‌سنگ دگرگونی، ماسه سنگ تیره و کوارتزیت تشکیل شده است که میان‌لایه‌هایی از آهک و گدازه بازیک دارد. این سازند در همبری گسلی با سنگ‌های آتش‌فشانی- رسوبی کامبرین قرار دارد و بر اساس سن‌سنجی‌های اخیر نهشت آن مربوط به پرکامبرین پسین (۱۹±۶۲۷ میلیون سال) است [۱، ۷، ۸]. معادن و ناهنجاری‌های ساغند در مجموعه‌ای از سنگ‌های آتش‌فشانی- رسوبی تشکیل شده‌اند که بر اساس آخرین سن‌سنجی‌ها، سن کامبرین پیشین (۲٫۸±۵۲۸٫۰ میلیون سال) دارند [۱، ۸] و شامل توالی لایه‌لایه از سنگ‌های بیشتر دگرگون نشده مرکب از سنگ‌های آتش‌فشانی حد واسط تا اسیدی، آهک‌های دولومیتی و کمی لایه‌های سنگ گچ است که اغلب در بخش‌های جنوبی منطقه ساغند رخنمون دارند. این مجموعه به نام‌های توالی آتش‌فشانی- رسوبی کامبرین، مجموعه‌های ریزو- دزو، سازند اسفوردی و سازند ساغند در مناطق مختلف بین پشت بادام و کرمان نیز شناخته می‌شوند [۱، ۹]. نظام‌های زمین ساختی ماگمایی متنوعی برای رخدادهای ماگمایی و کانی‌سازی قطعه پشت بادام در ایران مرکزی پیشنهاد شده‌اند.



شکل ۲ نقشه زمین‌شناسی و موقعیت کانسارهای منطقه بافق.

[DOI: 10.61186/ijcm.32.2.301]

موقعیت پهنه کششی با تشکیل یک کافت ناقص نخست توسط حقی پور و پلیسیر [۱۰] پیشنهاد شد که بعدها توسط پژوهشگران دیگر از جمله سامانی [۱۱] و دلیران [۱۲] تأیید گردید، البته با تازگی پژوهشگران بر اساس بررسی‌های زمین شیمی و سن‌سنجی گسترده در قطعه پشت بادام باور دارند که فعالیت ماگمایی منطقه بافق - ساغند در ارتباط با یک فاز آهکی قلیایی کمانی در کامبرین پیشین رخ داده است [۱، ۹، ۱۳، ۱۴].

خاستگاه کانسارهای آهن و عناصر همراه در منطقه فلززایی بافق- ساغند همواره چالش برانگیز بوده و مدل‌های مختلفی برای زایش آن‌ها پیشنهاد شده است. جدایش ماگمای برآمده از ماگماهای قلیایی یا کربناتیتی [۱۱، ۱۵]، نقش سیال‌های گرمابی [۱۲، ۱۶]، جدایش مذاب‌ها و فرایندهای گرمابی [۱۷]، نقش همزمان ماگما و سیال‌های ماگمایی- جوی [۱۸] از جمله مدل‌های زایشی ارائه شده برای منطقه بافق هستند و کانه‌زایی عناصر پرتوزای اورانیوم (برای مثال، کانسارهای ناهنجاری ۱ و ۲ ساغند) و توریم (برای مثال، کانسارهای چغارت، سه چاهون و چاه گز) روی کانسنگ آهن برنهشته شده است [۸، ۱۳، ۱۴، ۱۹، ۲۰].

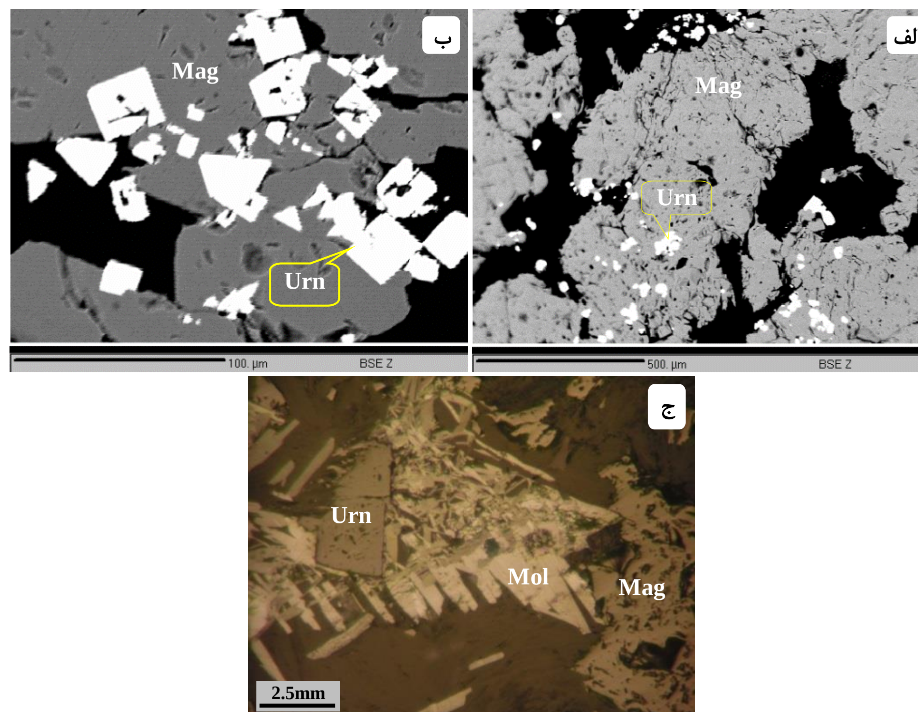
روش بررسی

طی بازدید از تونل‌های زیرزمینی معدن ناهنجاری ۲ ساغند با طیف‌سنج RS-230، تعداد ۲۵ نمونه از کانسنگ اورانیوم با پرتوزایی مختلف برداشت شد و ۱۱ مقطع صیقلی و ۱۰ مقطع نازک-صیقلی از نمونه‌های برگزیده تهیه گردید. در ادامه، برای شناسایی دقیق‌تر عناصر موجود، تعداد ۸ نمونه با پرتوزایی‌های متفاوت برای طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت شده القایی (ICP- MS) به آزمایشگاه زرآزما ارسال شد. در آنجا، نمونه‌ها پس از خردایش، با آسیاب گلوله‌ای تا حد ۲۰۰ مش پودر شده و ذوب قلیایی گردیدند؛ نمونه‌های ذوب شده با روش ۴ اسید (۱ واحد اسید نیتریک و ۳ واحد اسید کلریدریک) به‌صورت محلول درآمدند و با دستگاه ICP-MS با حد تشخیص ppm ۰/۱ برای عناصر پرتوزا و عناصر خاکی نادر بررسی شدند. طی تجزیه نمونه‌ها، به پاکیزگی ابزار به‌منظور جلوگیری از آلودگی بسیار دقت شد. پس از آن به‌منظور شناسایی دقیق‌تر کانی‌ها و عناصر خاکی نادر، نمونه‌ها برای تجزیه ریزپردازشی به شرکت تحقیقات و فرآوری مواد معدنی ارسال شدند، اما به دلیل خرابی دستگاه، از داده‌های ریزطیفی پرتوی ایکس از آزمایشگاه کانی‌شناسی مجموعه فرآوری مواد معدنی وزارت انرژی روسیه استفاده شد. نتایج به‌دست‌آمده از تجزیه‌های شیمیایی با نرم‌افزارهای Geoplot و SPSS پردازش شده و داده‌ها تحلیل گردیدند.

کانی‌شناسی کانسنگ اورانیوم

در ناهنجاری ۲ ساغند، کانی‌سازی آهن- اورانیوم همراه با مقادیر بالای عناصر خاکی نادر رخ داده و در واقع، کانی‌سازی به صورت یک کانسنگ آهن- اورانیوم- عناصر خاکی نادر است [۴]. کانی‌های اصلی اورانیوم- عناصر خاکی نادر در ناهنجاری ۲ ساغند اورانینیت، کلوئیت و کانی‌های فرعی برانریت و توریانیت هستند [۴] که اغلب به‌صورت همبرزادی با مگنتیت و پیریت تشکیل شده‌اند. کانسار ناهنجاری ۲ ساغند در واقع یک کانسار آهن- اورانیوم بوده که طی دو مرحله تشکیل شده است؛ در مرحله اول، کانه‌زایی آهن و در مرحله بعدی، کانه‌زایی اورانیوم رخ داده است. مگنتیت و پیریت دارای دو نسل هستند که نسل اول درشت دانه و در ارتباط با کانه‌زایی آهن بوده و نسل دوم ریزدانه در ارتباط با کانه‌زایی اورانیوم است (شکل ۳). مگنتیت، پیریت و مولیبدنیت از مهم‌ترین کانی‌های فلزی و سرپانتین، طلق و کلسیت از مهم‌ترین کانی‌های غیرفلزی در کانسنگ اورانیوم ناهنجاری ۲ ساغند هستند.رگچه‌هایی از کلسیت صورتی (با ضخامت تا ۲ سانتی‌متر)، فرودولومیت خاکستری روشن و کلریت نیز در کانسنگ اورانیوم دیده می‌شوند [۴]. اورانینیت، برانریت و مولیبدنیت اغلب به صورت دانه‌های ریزی در بلورهای مگنتیت پراکنده هستند (شکل ۳ الف). هماتیت نیز در لبه بلورهای اورانینیت در زمینه طلق به طور مستقیم و یا از دگرسانی مگنتیت تشکیل شده است. اورانینیت به صورت بلورهای مکعبی، شش‌گوشی و سه گوشی در اندازه چند تا ۷۵ میکرون (اغلب ۱۰ تا ۲۰ میکرون) با ترکیب متغیر از اورانینیت خالص تا کلوئیت و گاهی با منطقه‌بندی ترکیبی وجود دارد (شکل ۳ ب) [۴].

[DOI: 10.61186/ijcm.32.2.301]



شکل ۳ الف) تصویر الکترونی پس پراکنده (BSE) از میانبارهای اورانینیت درون مگنتیت، ب) تصویر BSE از درهمرشدی مگنتیت و بلورهای مکعبی و سه گوشی، پ) تصویر میکروسکوپی از همبرزادی مولیبدنیت و اورانینیت با مگنتیت در کانسنگ اورانیوم ناهنجاری ۲ ساغند (Mag: مگنتیت، Mol: مولیبدنیت، Urn: اورانینیت) [۴].

زمین شیمی عناصر خاکی نادر

زمین شیمی کانسنگ اورانیوم

چکیده‌ای از نتایج آماری تجزیه عناصر موجود در کانسنگ اورانیوم ناهنجاری ۲ ساغند در جدول ۱ آورده شده‌است. بیشترین مقادیر عناصر اصلی در نمونه‌های برداشت شده مربوط به آهن و گوگرد بوده که ناشی از حضور مگنتیت و پیریت در کانسنگ است. همچنین بیش‌ترین مقادیر در بین عناصر فرعی و نادر مربوط به اورانیوم و ایتریم و به ترتیب برابر با ۴۷۶۴ و ۴۹۹ ppm است. گستره تغییرات اورانیوم در نمونه‌های برداشت شده ۱۳۶۴ تا ۴۷۶۴ ppm است. بیشترین گستره تغییرات عناصر خاکی نادر و نادر مربوط به Y و برابر با ۳۴۹ppm (۱۵۰-۴۹۹ppm) است. به‌منظور بررسی توزیع عناصر از پارامتر آماری چولگی (Skewness) استفاده گردید که بر اساس آن، عناصر Ce، Fe، Hf، Nb، S، Sc، Ta، W، Yb و Zr دارای توزیع غیرعادی هستند. بیش‌ترین گستره تغییرات عناصر مربوط به عناصر آهن، گوگرد، ایتریم و اورانیوم است و عناصر Cs، Eu، Hf، In، La، Ta و W کمترین گستره تغییرات در بین عناصر تجزیه شده را دارند. سایر عناصر چون Dy، Er، Gd، Yb و Zr دارای گستره تغییرات ۱ تا۱۰۰ ppm هستند.

به‌منظور بررسی ارتباط بین عناصر خاکی نادر با اورانیوم، ضریب همبستگی بین آنها محاسبه شد و نتایج آن در جدول ۲ آورده شده است. بر این اساس، اورانیوم با بیشتر عناصر خاکی نادر ضریب همبستگی مثبت بالایی دارد. (از جمله ۰٫۹۲۴ با Ce، ۰٫۹۶۱ با Dy، ۰٫۹۵۹ با Er، ۰٫۹۶۲ با Gd، ۰٫۹۴۰ با Lu، ۰٫۹۷۰ با Nd، ۰٫۹۸۳ با Pr، ۰٫۹۶۹ با Sm، ۰٫۹۶۶ با Tb و ۰٫۹۶۴ با Tm)این امر به احتمال بسیار ناشی از ویژگی‌های زمین شیمی مشابه اورانیوم با عناصر خاکی نادر طی فعالیت محلول‌های گرمابی طی کانه‌زایی و حمل آن‌ها توسط یک سیال مشترک است. از سوی دیگر از آنجا که در بررسی های کانی‌شناسی، کانی مستقل عناصر خاکی نادر در مقدار قابل توجه دیده نشد، به احتمال بسیار اورانینیت کانی اصلی میزبان عناصر خاکی نادر است. افزون بر عناصر خاکی نادر، اورانیوم دارای ضریب همبستگی به نسبت بالا با آهن (۰٫۷۴۴) و گوگرد (۰٫۷۰۳) بوده که این امر به دلیل حضور مگنتیت و پیریت در کانسنگ اورانیوم است. در بین عناصر، اورانیوم با تیتانیوم ضریب همبستگی منفی (-۰٫۸۰۸) دارد. از آن جا که

[DOI: 10.61186/ijcm.32.2.301]

کمپلکس‌های تیتانیوم در شرایط به شدت احیایی تشکیل می‌شوند، ارتباط منفی بین اورانیوم و تیتانیوم نشان‌دهنده شرایط به نسبت اکسایشی محلول‌های گرمابی در طی انتقال و ته‌نشینی اورانیوم در کانسار ناهنجاری ۲ ساغند است. برخی از عناصر از جمله Nb ،Hf و Sc با هم ضریب همبستگی مثبت بالا (بیش از ۰٫۹۰۰)، با اورانیوم ضریب همبستگی منفی و با تیتانیوم ضریب همبستگی مثبت به نسبت بالا (بیش از ۰٫۳۰۰) دارند که این امر نشان‌دهنده شرایط متفاوت ترمودینامیکی و فیزیکوشیمیایی در انتقال و ته نشینی این عناصر با اورانیوم است. از این رو، عناصر اصلی و خاکی نادر در کانسنگ اورانیوم ناهنجاری ۲ ساغند را بر پایه همراهی با اورانیوم می‌توان به دو دسته تقسیم کرد. دسته اول که شامل آهن، گوگرد و برخی از عناصر خاکی نادر چون Er ،Dy ،Ce و Gd هستند، با اورانیوم ضریب همبستگی مثبت دارند و این عناصر به‌صورت مگنتیت (آهن)، پیریت (آهن و گوگرد) و اورانینیت (اورانیوم و عناصر خاکی نادر) نهشته شده‌اند، این موضوع در بررسی های کانی‌شناسی به‌صورت همبرزایی کانی‌های مگنتیت- پیریت- اورانینیت تأیید می‌شود. دسته دوم شامل تیتانیوم و عناصر جزئی همچون Hf و Nb هستند که با اورانیوم ضریب همبستگی منفی دارند و از این رو در شرایط ترمودینامیکی متفاوتی از اورانیوم ته‌نشین شده‌اند. با توجه به همبستگی بسیار قوی بین اورانیوم و عناصر خاکی نادر و همچنین ایتریم، می‌توان گفت که میزبان اصلی عناصر خاکی نادر و ایتریم کانی اورانینیت است و با افزایش مقدار اورانیوم در کانسنگ، مقدار این عناصر نیز افزایش می‌یابد.

جدول ۱ خلاصه آماری عناصر در کانسنگ اورانیوم ناهنجاری ۲ ساغند

عنصر	یکا	متوسط	میانه	انحراف معیار	چولگی	کشیدگی	گستره	کمینه	بیشینه
Fe	%	۴۷٫۲۳	۵۰٫۸۶	۱۶٫۲	-۱٫۳۱۶	۱٫۶۷	۴۰٫۸۴	۲۱٫۰۳	۶۱٫۸۷
S	%	۱٫۹	۱٫۵	۱٫۶	۱٫۷۹۰	۳٫۵۹	۴٫۰۳	۰٫۵۷	۴٫۶
Ce	ppm	۳۶	۲۸٫۰۰	۲۱٫۹۱	۱٫۴۴۵	۲٫۱۲	۵۶٫۰۰	۱۶٫۰۰	۷۲٫۰۰
Cs	ppm	۰٫۷۰	۰٫۵۰	۰٫۲۸	۰٫۸۸۴	-۱٫۷۵	۰٫۶۰	۰٫۵۰	۱٫۱۰
Dy	ppm	۶۴٫۰۸	۶۲٫۰۵	۲۸٫۵۷	۰٫۸۰۵	۰٫۱۵	۷۲٫۰۳	۳۴٫۹۶	۱۰۶٫۹۹
Er	ppm	۴۶٫۷۹	۴۲٫۳۲	۲۰٫۰۳	۰٫۸۴۸	۰٫۱۵	۵۱٫۱۰	۵۲٫۸۰	۷۶٫۹۰
Eu	ppm	۰٫۶۵	۰٫۶۷	۰٫۳۱	-۰٫۹۳۰	۰٫۹۴	۰٫۸۲	۰٫۱۶	۰٫۹۸
Gd	ppm	۳۹٫۵۲	۴۱٫۳۱	۱۹٫۰۹	۰٫۷۰۰	۰٫۰۱	۴۷٫۸۲	۲۰٫۰۶	۶۷٫۸۸
Hf	ppm	۰٫۵۲	۰٫۵۰	۰٫۰۵	۲٫۲۳۶	۵٫۰۰	۰٫۱۱	۰٫۵۰	۰٫۶۱
In	ppm	۰٫۵	۰٫۵۰	۰٫۰۰	-	-	۰٫۰۰	۰٫۵۰	۰٫۵۰
La	ppm	۱	۱٫۰۰	۰٫۰۰	-	-	۰٫۰۰	۱٫۰۰	۱٫۰۰
Lu	ppm	۴٫۶۲	۴٫۰۸	۲٫۵۹	۰٫۸۸۶	۰٫۷۵	۴٫۱۹	۲٫۸۶	۷٫۰۵
Nb	ppm	۲٫۵۲	۲٫۱۰	۱٫۱۲	۲٫۰۷۷	۴٫۴۲	۲٫۷۰	۱٫۸۰	۴٫۵۰
Nd	ppm	۳۰٫۰۶	۳۳٫۹۰	۱۳٫۷۸	-۰٫۲۹۹	-۱٫۳۷	۳۴٫۵۰	۱۲٫۰۰	۴۶٫۵۰
Pr	ppm	۲٫۳۴	۲٫۸۱	۱٫۲۶	-۰٫۶۸۰	-۰٫۰۹	۳٫۲۷	۰٫۵۰	۳٫۷۷
Sc	ppm	۲۰٫۲۰	۱۵٫۹۰	۱۵٫۵۷	۲٫۰۱۸	۴٫۲۷	۳۸٫۶۰	۸٫۹۰	۴۷٫۵۰
Sm	ppm	۲۴٫۵۶	۲۷٫۵۷	۱۱٫۲۷	۰٫۲۶۶	-۰٫۹۹	۲۸٫۱۰	۱۱٫۹۱	۴۰٫۰۱
Ta	ppm	۰٫۲۹	۰٫۲۶	۰٫۰۸	۲٫۰۹۳	۴٫۴۸	۰٫۱۹	۰٫۲۴	۰٫۴۳
Tb	ppm	۸٫۳۹	۸٫۳۵	۳٫۸۳	۰٫۷۶	۰٫۱۷	۹٫۷۱	۴٫۴۱	۱۴٫۱۲
Th	ppm	۴۵٫۵۲	۳۶٫۸۶	۲۲٫۲۳	۰٫۵۰۰	-۲٫۷۷	۴۸٫۳۶	۲۴٫۶۴	۷۳
Ti	ppm	۲۰۲٫۲۰	۱۶۵	۱۵۵٫۸۵	۰٫۳۸۵	-۱٫۴۵	۳۸۶	۲۴	۴۱۰
Tm	ppm	۶٫۴۹	۵٫۹۱	۲٫۵۸	۰٫۹۲۳	۰٫۷۶	۶٫۷۴	۳٫۷۱	۱۰٫۴۵
U	ppm	۳۰۸۸٫۷۰	۳۲۸۴٫۲	۱۲۵۳٫۷۴	-۰٫۱۰۹	۰٫۵۲	۳۳۹۹٫۳	۱۳۶۴٫۷۰	۴۷۶۴
W	ppm	۱٫۱۶	۱	۰٫۳۶	۲٫۲۳۶	۵	۰٫۸۰	۱	۱٫۸۰
Y	ppm	۲۹۳٫۹۲	۲۵۸٫۸۰	۱۳۵٫۸۵	۰٫۸۶۹	۰٫۲۷	۳۴۸٫۹۰	۱۵۰٫۱۰	۴۹۹
Yb	ppm	۳۷٫۴۰	۳۲٫۲۰	۱۴٫۱۶	۱٫۰۴۴	۱٫۰۹	۳۷٫۱۰	۲۲٫۴۰	۵۹٫۵۰
Zr	ppm	۲۶	۲۲	۱۱٫۳۱	۲٫۰۹۹	۴٫۵۸	۲۸	۱۸	۴۶

[DOI: 10.61186/ijcm.32.2.301]

جدول ۲ ضریب همبستگی بین عناصر در کانسنگ اورانیوم ناهنجاری ۲ ساغند

	Ce	Cs	Dy	Er	Eu	Fe	Gd	Hf	Lu	Nb	Nd	Pr	S	Sc	Sm	Sr	Tb	Th	Ti	Tm	U	Y	Yb	Zr
Ce	۱	۰٫۲۲۶	۰٫۹۷۶	۰٫۹۸۵	۰٫۳۵	۰٫۴۳۸	۰٫۹۵۹	-۰٫۳۰۶	۰٫۹۸۳	-۰٫۲۰۳	۰٫۸۴۸	۰٫۸۴۳	۰٫۸۲۷	-۰٫۴۰۰	۰٫۹۱۶	-۰٫۰۲۳	۰٫۹۷۲	۰٫۷۴۵	۰٫۵۶۳	۰٫۹۹	۰٫۹۲۴	۰٫۹۸۷	۰٫۹۹۳	-۰٫۲۵۸
Cs		۱	۰٫۲۸۰	-۰٫۱۹۷	۰٫۱۰۱	۰٫۱۳۷	-۰٫۳۴۳	۰٫۷۹۱	-۰٫۰۵۱	۰٫۷۴	-۰٫۲۷۳	-۰٫۱۲۹	-۰٫۴۲۱	۰٫۶۷۳	۰٫۳۴۶	۰٫۵۴۳	۰٫۲۹۲	۰٫۲۳	۰٫۲۷۶	-۰٫۱۸۵	-۰٫۱۱۹	-۰٫۱۷۵	-۰٫۱۲۷	۰٫۸۱۳
Dy			۱	۰٫۹۹۵	۰٫۵۰۶	۰٫۵۷۹	۰٫۹۹۵	-۰٫۴۲۵	۰٫۹۵۹	-۰٫۳۵۰	۰٫۹۳	۰٫۹۱۷	۰٫۷۴۸	-۰٫۵۱۵	۰٫۹۷۶	۰٫۰۴۶	۰٫۹۹۹	۰٫۷۳۸	-۰٫۷۰۶	-۰٫۷۹۲	۰٫۹۶۱	۰٫۹۹۲	۰٫۹۷۶	۰٫۳۹۷
Er				۱	۰٫۴۸	۰٫۵۶۲	۰٫۹۸۱	۰٫۳۶۲	۰٫۹۸۱	-۰٫۲۸۳	۰٫۹۰۴	۰٫۹۰۳	۰٫۷۳۶	-۰٫۴۶۷	۰٫۹۵۴	۰٫۰۹۷	۰٫۹۹۱	۰٫۷۸۹	۰٫۶۵۷	۰٫۹۹۸	۰٫۹۵۹	۱	۰٫۹۹۱	-۰٫۳۲۴
Eu					۱	۰٫۹۹۳	۰٫۵۳۹	-۰٫۱۳۵	۰٫۴۱۷	-۰٫۲۲۵	۰٫۷۶	۰٫۷۹۴	۰٫۰۷۶	-۰٫۱۹	۰٫۶۳۷	۰٫۲۶۵	۰٫۵۲۴	۰٫۳۰۱	۰٫۹۱۰	۰٫۴۷۴	۰٫۶۷۷	۰٫۴۷۲	۰٫۴۲۰	-۰٫۲۲۲
Fe						۱	۰٫۶۰۳	-۰٫۱۱۳	۰٫۵۱۲	-۰٫۱۸۹	۰٫۸۲۰	۰٫۸۴۴	۰٫۱۴۲	-۰٫۱۸۵	۰٫۶۹۰	۰٫۲۸۹	۰٫۵۹۴	۰٫۳۹۴	-۰٫۹۰۸	۰٫۵۵۷	۰٫۷۴۴	۰٫۵۵۶	۰٫۵۱۱	-۰٫۱۸۷
Gd							۱	-۰٫۴۶۰	۰٫۹۳۲	۰٫۳۹۱	۰٫۹۵۲	۰٫۹۳۰	۰٫۷۵۷	۰٫۵۳۵	۰٫۹۹۱	-۰٫۰۱۱	۰٫۹۹۸	۰٫۶۷۵	-۰٫۷۵۶	۰٫۹۷۸	۰٫۹۶۲	۰٫۹۷۵	۰٫۹۵۵	-۰٫۴۴۵
Hf								۱	-۰٫۱۹۰	۰٫۹۸۵	-۰٫۳۹۲	-۰٫۲۷۵	-۰٫۱۲۸	۰٫۹۸۰	۰٫۴۶۴	-۰٫۰۸۱	۰٫۴۲	-۰٫۲۱۸	۰٫۳۷۹	-٫۳۲۰	-۰٫۲۴۶	-۰٫۳۳۷	-۰٫۲۵۳	۰٫۹۸۸
Lu									۱	-۰٫۱	۰٫۸۴۲	۰٫۸۶۳	۰٫۷۵۴	۰٫۳۰۸	۰٫۸۹۳	۰٫۰۹۸	۰٫۹۵۳	۰٫۸۱۳	-۰٫۵۶۱	۰٫۹۸۷	۰٫۹۴	۰٫۹۸۶	۰٫۹۹۷	-٫۱۴۰
Nb										۱	-۰٫۳۷	۰٫۲۵۹	۰٫۰۰	۰٫۹۶۲	-۰٫۴۱۶	-۰٫۱۴۳	-٫۳۵۳	-۰٫۱۶۱	۰٫۴۲۱	-۰٫۲۳۷	-۰٫۲۰۱	-۰٫۲۵۶	-۰٫۱۶۲	۰٫۹۹۱
Nd											۱	۰٫۹۸۹	۰٫۶۴۵	-۰٫۴۵۳	۰٫۹۸۳	-۰٫۰۰۲	-۰٫۹۴۱	۰٫۵۵۶	-۰٫۹۱۵	۰٫۹۰۳	٫۹۷	۰٫۸۹۶	۰٫۸۶۴	-۰٫۴۱۹
Pr												۱	۰٫۶۱۱	-۰٫۳۵۵	۰٫۹۶۱	۰٫۰۷	۰٫۹۲۶	۰٫۶۰۵	۰٫۸۹۸	۰٫۹۰۵	۰٫۹۸۳	۰٫۸۹۹	۰٫۸۷۴	-۰٫۳
S													۱	-۰٫۱۲۴	۰٫۷۱۴	-۰٫۵۷۱	۰٫۷۵۴	۰٫۲۷۶	-۰٫۳۹۵	۰٫۷۶۶	۰٫۷۰۳	۰٫۷۴	۰٫۷۷۶	-۰٫۱۱
Sc														۱	-۰٫۵۳	-۰٫۲۳۸	-۰٫۵۱	-۰٫۳۹۹	۰٫۳۹۸	-۰٫۴۲۱	-۰٫۳۳۴	-۰٫۴۴۵	-۰٫۳۶۱	٫۹۵۱
Sm															۱	۰٫۰۱۴	۰٫۹۸۳	۰٫۶۲	-۰٫۸۳۷	۰٫۹۵۱	۰٫۹۶۹	۰٫۹۴۷	۰٫۹۱۸	-۰٫۴۶۸
Sr																۱	۰٫۰۲۴	۰٫۶۲۹	۰٫۰۱۹	۰٫۰۵۶	۰٫۰۴۹	۰٫۰۹۹	۰٫۰۶	-۰٫۰۲۳
Tb																	۱	۰٫۷۱۶	-۰٫۷۲۷	۰٫۹۹	۰٫۹۶۶	۰٫۹۸۸	۰٫۹۷۲	-۰٫۴۰۲
Th																		۱	-۰٫۲۷۹	۰٫۷۶۹	۰٫۶۸۰	۰٫۷۹۶	۰٫۷۸۹	-۰٫۱۲۴
Ti																			۱	-۰٫۶۵۳	-۰٫۸۰۸	-۰٫۶۴۴	۰٫۵۹	۰٫۴۶۱
Tm																				۱	۰٫۹۶۴	۰٫۹۹۹	۰٫۹۹۵	-۰٫۲۸۳
U																					۱	۰٫۹۵۸	۰٫۹۴۷	-۰٫۲۴۸
Y																						۱	۰٫۹۹۴	-۰٫۲۹۷
Yb																							۱	-۰٫۲۰۷
Zr																								۱

الگوی REEهای بهنجار شده نسبت به کندریت [۲۱] برای کانسنگ اورانیوم ناهنجاری ۲ ساغند در شکل ۴ ارائه شده است. ویژگی‌های مهم الگوهای REE براساس سه عامل ۱) فراوانی کل عناصر خاکی نادر (ΣREE) برحسب ppm، ۲. ضریب تفکیک‌شدگی درون گروهی REEهای سبک (LREE=La+Ce+Nd) نسبت به REEهای سنگین (HREE= Dy+Er+yb) برای مقادیر بهنجار شده نسبت به کندریت (LREE/HREE) و ۳) الگوی رفتاری توزیع‌های به‌هنجار شده نسبت به کندریت دارای یون‌های Eu^{2+} و Eu^{3+} توصیف می‌شوند [۲۲]. عامل آخر وابسته به گریزندگی اکسیژن است و به‌صورت Eu/Eu* توصیف می‌شود [۲۲] که Eu* یک مقدار نظری قابل محاسبه و برابر با $\sqrt{Sm} \times \sqrt{Gd}$ است [۲۳]. فراوانی کلی REEها در نمونه‌های کانسنگ اورانیوم ناهنجاری ۲ ساغند از ۱۵۴٫۷۷ تا ppm ۵۰۵٫۸۵ متغیر است. ضریب تفکیک‌شدگی LREE ها نسبت به HREEها در این کانسنگ برابر با ۰٫۱۷ است. تغییر در رفتار Eu که یک یون با ظرفیت‌های متغیر است، زیاد است. مقدار Eu/Eu* در کانسنگ اورانیوم ناهنجاری ۲ ساغند، ۰٫۰۶۷ است که ناهنجاری منفی قوی و آشکار Eu را نشان می‌دهد.

زمین شیمی اورانینت‌های ناهنجاری ۲ ساغند

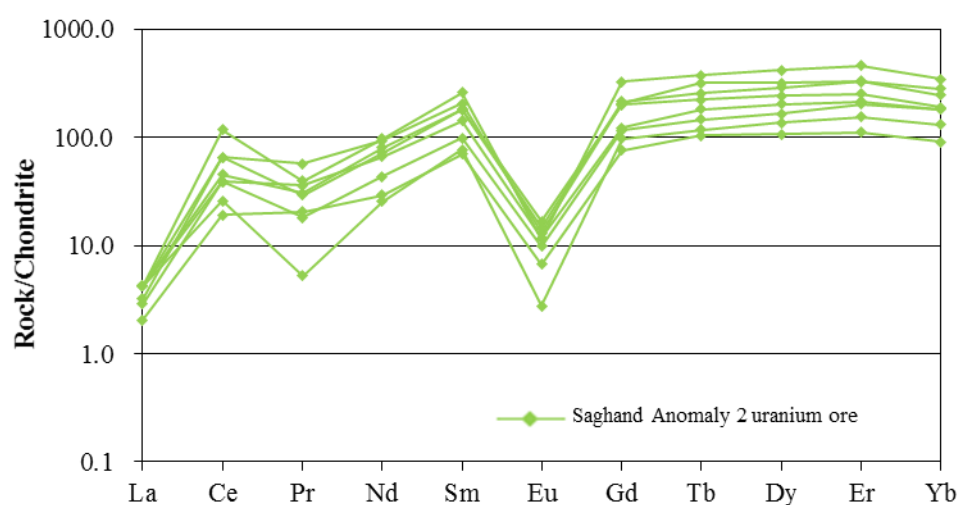
مقادیر عناصر اصلی، خاکی نادر و کمیاب در اورانینیت ناهنجاری ۲ ساغند در جدول‌های ۳ تا ۵ ارائه شده‌اند. غلظت میانه (Median) UO_2 در نمونه‌های مورد بررسی، ۷۴٫۰۶ درصد وزنی با متوسط حدود ۷۴٫۵۳ درصد وزنی است (جدول ۳).

مقدار ThO_2 در نمونه‌های مورد بررسی اغلب زیر حد آشکارسازی و یا در حد چند دهم درصد وزنی است ولی مقدار آن در برخی نقاط به ۲-۱ درصد وزنی می‌رسد. مقدار متوسط Th در نمونه‌های مورد بررسی، حدود ۰٫۰۹ درصد وزنی است و این مقدار در برخی نقاط نمونه‌ها تا ۲٫۶۴ درصد وزنی افزایش

[DOI: 10.61186/ijcm.32.2.301]

می‌یابد (جدول ۴). مقدار میانه ThO_2 برابر با ۰٫۱۷۵ درصد وزنی است (جدول ۴).

غلظت PbO در کانی اورانینیت تغییرات زیادی دارد و از حد آشکارسازی تا بیش از ۶٫۳۰ درصد وزنی متغیر است (جدول ۴). گستره مقدار PbO از حدود ۱٫۳۵ درصد وزنی تا حدود ۶٫۷۹ درصد وزنی است (جدول ۴). مقادیری از CaO در همه اورانینیت‌ها وجود دارد و از زیر حد آشکارسازی تا حدود ۱٫۲۳ درصد وزنی تغییر می‌کند و مقدار میانه آن، ۰٫۵۲ درصد وزنی است. مقدار SiO_2 از زیر حد آشکارسازی تا ۱٫۹۲ درصد وزنی متغیر بوده و تنها در یک نقطه مقدار آن ۷٫۰۶ درصد وزنی است (جدول ۴). مقدار میانه SiO_2 برابر با ۰٫۷۶ درصد وزنی است. به‌طورکلی، تغییرات Fe_2O_3 بیشتر از SiO_2 بودهو Fe_2O_3 دارای گستره تغییرات ۱٫۲۸ تا ۶٫۹۰ درصد وزنی با میانه ۱٫۹۷ درصد وزنی است (جدول ۴). در اورانینیت‌های ناهنجاری ۲ ساغند، مقدار قابل توجهی Y_2O_3 وجود دارد و مقدار میانه آن ۱۴٫۸۱ درصد وزنی است. بیش‌ترین مقدار Y_2O_3 برابر با ۲۰٫۷۷ و درصد کمترین مقدار آن ۱۱٫۳۵ درصد است.



شکل ۴ الگوی توزیع عناصر خاکی نادر بهنجار شده نسبت به کندریت [۲۱] در کانسنگ اورانیوم ناهنجاری ۲ ساغند.

جدول ۳ چکیده داده های آماری عناصر در اورانینیت‌های ناهنجاری ۲ ساغند (برحسب درصد وزنی).

عنصر	یکا	متوسط	میانه	انحراف معیار	چولگی	کشیدگی	گستره	کمینه
La	۰٫۱۲۹	۰٫۶۵	۰٫۱۲۷	۱٫۱۱۷	۰٫۱۹۸	۰٫۳۵۰	۰٫۲۰	۰٫۳۷
Pr	۰٫۱۳۴	۲٫۱۴	۰٫۰۶۱	٫۰۰۱	-۲٫۰۷۲	۰٫۱۵۰	۰٫۶۰	۲۱۰
Nd	۰٫۷۵۷	۰٫۶۸	۰٫۵۳۲	۰٫۳۳۶	-۱٫۲۳۷	۱٫۶۹۰	۰٫۱۰	۱٫۷۰
Sm	۰٫۵۱۸	۰٫۵۳	۰٫۳۱۶	۰٫۵۴۲	-۰٫۵۴۴	۱٫۰۴۰	۰٫۶۰	۱٫۱۰
Eu	۰٫۵۷۵	۰٫۲۳۰	۱٫۱۳۴	۳٫۱۶۶	۱۰٫۲۳۵	۳٫۹۱۰	۰٫۴۰	۳٫۹۵
Gd	۲٫۴۴۶	۲٫۳۸	۱٫۴۲۱	۰٫۴۰۱	۰٫۲۱۶	۵٫۳۱۰	۰٫۲۱	۵٫۵۲
Tb	۰٫۹۸	۰٫۹۴	۰٫۶۷۳	۰٫۷۹۱	۱٫۴۲۳	۲٫۱۴۰	۰٫۱۵	۲٫۲۹
Dy	۱٫۹۲۱	۱٫۷۹	۱٫۰۶۵	-۰٫۲۳۱	-۱٫۱۳۷	۳٫۲۶	۰٫۲۴	۳٫۵۰
Ho	۰٫۲۸	۰٫۱۷	۰٫۲۹	۱٫۰۰۸	-۰٫۶۱۱	۰٫۷۴	۰٫۰۲	۰٫۷۶
Er	۱٫۲۴۶	۱٫۰۷۵	۱٫۰۶۰	۲٫۱۵۷	۶٫۴۲۲	۴٫۳۶۰	۰٫۰۶	۴٫۴۲
Tm	۲٫۲۲	۲٫۲۲	-	-	-	۰	۲٫۲۲	۲٫۲۲
Yb	۰٫۹۰	۱٫۰۴	۰٫۵۷۸	۰٫۵۳۰	-۰٫۳۴۶	۱٫۹۰۰	۰٫۱	۲
Lu	۰٫۳۸	۰٫۳۹	۰٫۲۳۷	-۰٫۰۹۸	-۱٫۳۰۱	۰٫۷۲	۰٫۰۵	۰٫۷۷
Sc	۰٫۰۹۶	۰٫۰۵۵	۰٫۰۹۲	۱٫۸۵۱	۳٫۶۰۳	۰٫۲۹۰	۰٫۰۳	۰٫۳۲
Cs	۰٫۲۲	۰٫۲۲	۰٫۱۱۸	-۰٫۰۳۵	-۰٫۹۱۷	۰٫۳۶۰	۰٫۰۴	۰٫۴

[DOI: 10.61186/ijcm.32.2.301]

جدول ۴ ترکیب اورانینیت ناهنجاری ۲ ساغند بر اساس داده‌های ریزطیفی پرتوی ایکس (برحسب درصد وزنی)

مجموع	Fe_2O_3	CaO	PbO	TiO_2	SiO_2	ThO_2	Ce_2O_3	Y_2O_3	UO_2	
۱۰۰٫۷۵	۱٫۸۶	۰٫۵	۳٫۶۳	۰٫۱۲	۱٫۰۳	۰٫۱۸	۱٫۱۵	۱۱٫۳۵	۷۹٫۹۳	۱
۱۰۰٫۵۵	۳٫۸۵	۰٫۴۳	۶٫۷۶	۰٫۰۶	۰٫۷۵	۰	۱	۱۱٫۵۰	۶۷٫۱۷	۲
۹۸٫۱۹	۱٫۲۸	۰٫۴۳	۵٫۶۹	۰٫۱۸	۰	۰	۱٫۶۱	۱۵٫۵۲	۷۳٫۴۸	۳
۱۰۰٫۰۸	۱٫۶۵	۰٫۴۳	۳٫۱۸	۰٫۱۹	۰٫۲۶	۰	۱٫۳۶	۱۷٫۵۹	۷۵٫۴۲	۴
۹۹٫۸۵	۵٫۵۱	۰٫۶	۴٫۹۵	۰٫۰۶	۰٫۳۸	۰	۱٫۷۹	۱۵٫۱۱	۷۱٫۴۵	۵
۱۰۰٫۵۹	۲٫۰۵	۰٫۸۱	۶٫۴۴	۰٫۱۸	۰٫۳۳	۰	۲٫۰۶	۱۴٫۴۶	۷۴٫۱۲	۶
۱۰۰٫۸۷	۴٫۳۴	۰٫۶۷	۶٫۸۱	۰٫۱۹	۷٫۰۶	۰	۲٫۰۳	۱۷٫۹۳	۶۳٫۹۳	۷
۱۰۰٫۴۵	۶٫۹۰	۰٫۵۱	۳٫۹۶	۰٫۰۶	۰٫۷۴	۰٫۱۲	۱٫۸۰	۱۴٫۹	۷۲٫۱۱	۸
۱۰۰٫۵۷	۶٫۱۶	۰٫۲۳	۶٫۸۵	۰٫۳۲	۰٫۴۲	۰	۰٫۸۶	۱۲٫۱۵	۷۳٫۴۸	۹
۱۰۰٫۵۱	۵٫۳۸	۰٫۸۴	۴٫۵۵	۰٫۱۰	۰٫۸۵	۰٫۱۱	۲٫۰۴	۱۸٫۸۲	۶۷٫۸۱	۱۰
۹۹٫۲۲	۴٫۵۱	۱٫۲۳	۵٫۲۳	۰٫۲۲	۱٫۰۱	۰٫۲۱	۱٫۸۲	۱۷٫۱۱	۶۷٫۹۳	۱۱
۱۰۰٫۰۱	۲٫۷۱	۰٫۷۱	۶٫۰۱	۰٫۱۲	۰٫۱۹	۰	۲٫۰۸	۱۷٫۱۰	۷٫۸۵	۱۲
۹۹٫۲۲	۲٫۲۷	۰٫۷۱	۳٫۱۶	۰٫۱۱	۰٫۲۷	۰٫۲۲	۱٫۸۲	۱۸٫۷۵	۷۱٫۹۱	۱۳
۱۰۰٫۶۷	۱٫۵۴	۰٫۵۳	۵٫۵۵	۱٫۰۱	۰٫۷۰	۰	۱٫۶۵	۱۶٫۱۰	۷۴٫۵۹	۱۴
۱۰۰٫۳۹	۱٫۴۵	۰٫۰۹	۳٫۲۰	۰٫۰۳	۱٫۶۸	۰٫۵۷	۰٫۴۵	۱۲٫۷۵	۸۰٫۱۷	۱۵
۱۰۰٫۹۲	۱٫۴۸	۰٫۴۵	۴٫۳۲	۰٫۲۵	۱٫۰۵	۲٫۶۴	۰٫۸۴	۱۲٫۳۵	۷۷٫۵۴	۱۶
۱۰۱٫۱۴	۱٫۳۶	۰٫۱۹	۴٫۹۲	۰٫۱۵	۰٫۹۴	۰٫۳۷	۰٫۸۴	۱۴٫۱۸	۷۸٫۱۹	۱۷
۹۹٫۵۰	۱٫۳۷	۰٫۱۷	۳٫۲۵	۰٫۱۷	۱٫۲۱	۰٫۴۵	۰٫۴۰	۱۳٫۵۴	۸۷٫۶۴	۱۸
۹۸٫۶۴	۱٫۲۹	۰٫۸۵	۴٫۹۵	۰٫۰۱	۰٫۲۰	۰٫۵۵	۱٫۰۱	۱۴٫۱۷	۷۵٫۶۱	۱۹
۱۰۰٫۹	۲٫۷۸	۰٫۰۸	۰	۰	۱٫۰۳	۱٫۹۳	۰٫۹۰	۱۳٫۵۲	۸۰٫۶	۲۰
۱۰۰٫۹۸	۱٫۴۷	۰٫۹۰	۴٫۷۳	۰٫۶۵	۰٫۴۳	۱٫۲۲	۱٫۰۴	۱۸٫۲۳	۷۲٫۳۲	۲۱
۹۸٫۴۹	۱٫۵۵	۰٫۲۰	۴٫۳۵	۰٫۱۴	۱٫۴۱	۱٫۶۲	۰٫۸۳	۱۴٫۳۹	۷۴	۲۲
۱۰۰	۲٫۲۷	۰٫۱۸	۱٫۷۱	۰٫۲۶	۰٫۳۴	۰٫۵۴	۰٫۳۳	۱۴٫۲۷	۸۰٫۱۰	۲۳
۱۰۰٫۷۸	۱٫۳۹	۰٫۷۸	۳٫۷۲	۰٫۰۶	۱٫۰۵	۱٫۲۸	۰٫۳۴	۱۱٫۸۷	۸۰٫۲۹	۲۴
۱۰۱٫۳۲	۱٫۵۶	۰٫۳۳	۲٫۵۲	۰٫۱۲	۰٫۸۰	۰٫۷۵	۱٫۱۸	۱۳٫۱۵	۸۰٫۹۱	۲۵
۱۰۱٫۰۳	۱٫۷۸	۰٫۳۸	۲٫۲۲	۰٫۳۶	۱٫۱۷	۰	۱٫۲۲	۱۴٫۵۱	۷۹٫۳۹	۲۶
۱۰۰٫۷۳	۰٫۵۲	۰	۳٫۴۶	۰٫۲۷	۰٫۷۲	۰٫۳۹	۰٫۳۶	۱۶٫۴۳	۷۷٫۵۸	۲۷
۱۰۰٫۰۸	۲٫۴۴	۰٫۷۴	۵٫۴۱	۰٫۲۵	۰٫۰۸	۰٫۱۷	۱٫۴۳	۱۷٫۹۰	۷۱٫۶۶	۲۸
۱۰۰٫۶۵	۲٫۶۷	۰٫۷۴	۳٫۷۳	۰٫۱۴	۰	۰٫۳۹	۱٫۳۴	۲۰٫۷۷	۷۰٫۸۷	۲۹
۱۰۱٫۰۴	۲٫۸۳	۰٫۲۳	۴٫۴۱	۰٫۸۰	۰٫۰۲	۰٫۱۷	۱٫۶۶	۱۷٫۲۳	۷۳٫۶۹	۳۰
۹۹٫۶۳	۵٫۹۰	۱٫۱۹	۴٫۰۴	۰٫۳۶	۱٫۹۲	۰	۱٫۸۴	۱۶٫۴۰	۶۷٫۹۸	۳۱
۹۹٫۱۶	۱٫۹	۰٫۷۷	۳٫۷۱	۰٫۱۲	۰٫۴۸	۰	۰٫۸۵	۱۸٫۸۶	۷۲٫۴۷	۳۲

جدول ۵ مقادیر عناصر خاکی نادر، اسکاندیم و سزیم در اورانینیت‌های ناهنجاری ۲ ساغند (برحسب درصد وزنی)

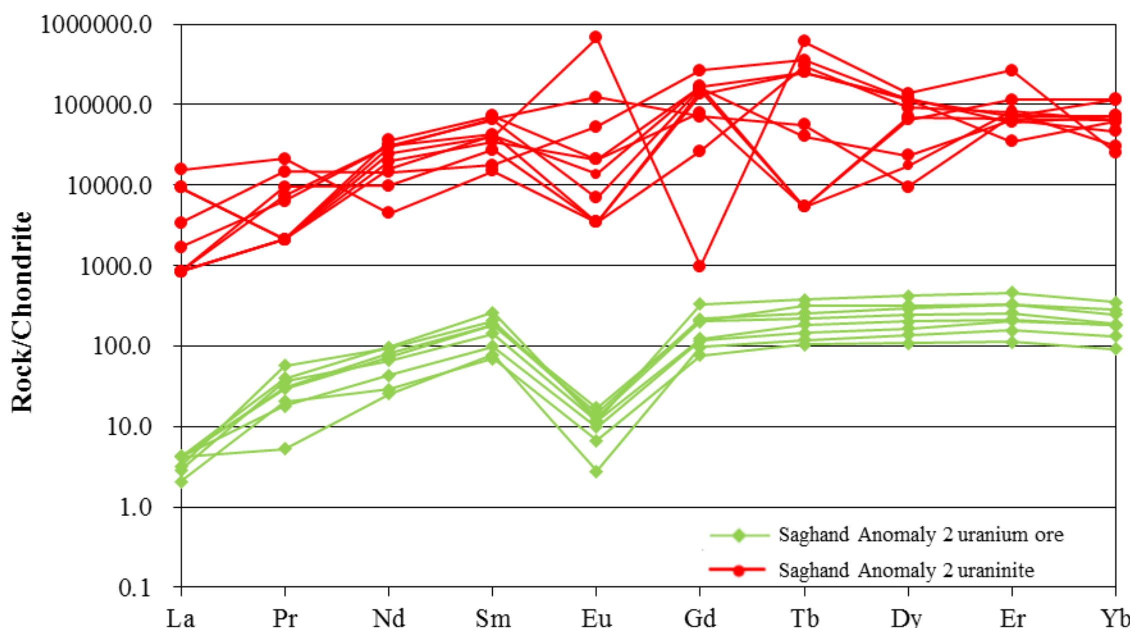
عنصر	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
Y-اورانیت									
La	-	-	۰٫۲۲	۰٫۲۲	-	۰٫۰۲	-	۰٫۰۴	-
Pr	-	-	-	-	۰٫۰۹	۰٫۰۷	۰٫۲۱	۰٫۰۶	-
Nd	۱٫۱۴	۰٫۹۲	۱٫۴۰	۱٫۷۰	۰٫۱۶	۱٫۴۵	۱٫۱۰	۱٫۴۴	۰٫۷۶
Sm	۰٫۶۱	۰٫۵۳	۱٫۰۳	۱٫۱۰	۰٫۱۲	۱	۰٫۵۳	۱٫۶۵	۰٫۶۴
Eu	۳٫۹۵	۰٫۱۲	۰٫۷۱	۰٫۱۲	-	۰٫۰۴	۰٫۱۶	-	۰٫۰۸
Gd	-	۳٫۴۹	۱٫۴۶	۱٫۶۳	۲٫۷۷	۳٫۲۹	۳٫۶۴	۳٫۰۷	۳٫۴۸
Tb	۲٫۲۹	۰٫۹۴	۰٫۲۱	-	۰٫۹۴	۰٫۱۵	-	-	-
Dy	۳٫۵۰	۲٫۹۰	۰٫۲۴	۱٫۶۴	۳٫۰۱	۰٫۵۹	۱٫۴۹	۱٫۷۹	۰٫۴۴
Ho	۰٫۰۲	۰٫۰۷	-	-	-	-	-	-	-
Er	۴٫۴۲	۱٫۱۸	۱٫۸۱	۱٫۹۰	۱	۱٫۰۶	۰٫۷۹	۱٫۰۹	۱٫۳۸
Tm	۲٫۲۲	-	-	-	-	-	-	-	-
Yb	۰٫۴۳	۱٫۲۴	۱٫۹۴	۲	۱٫۲۱	۰٫۷۹	۱٫۰۷	۱٫۱۱	۱٫۱۰
Lu	۰٫۱۹	۰٫۳۲	۰٫۲۳	-	۰٫۵۶	۰٫۷۷	۰٫۵۶	۰٫۶۲	۰٫۵۷
Se	۰٫۱۲	۰٫۰۳	۰٫۰۴	-	۰٫۰۷	۰٫۱۷	-	۰	۰٫۳۲
Cs	۰٫۲۰	۰٫۲۷	۰٫۱۸	۰٫۳۱	۰٫۳۹	۰٫۴۰	-	۰٫۲۲	۰٫۲۸
Thاورانیت									
La	-	۰٫۳۷	۰٫۰۳	۰٫۰۵	-	-	۰٫۰۸	-	
Pr	-	۰٫۲۰	-	۰٫۱۷	-	-	۰٫۱۴	-	
Nd	۰٫۲۶	۰٫۲۱	۰٫۳۷	۰٫۵۵	۰٫۲۹	۰٫۱۴	۰٫۶۸	۰٫۰۱	
Sm	۰٫۳۲	۰٫۲۳	۰٫۵۴	۰٫۱۸	۰٫۱۸	۰٫۰۶	۰٫۲۷	-	
Eu	-	-	۰٫۳۳	-	۰٫۲۸	-	۰٫۳۱	۰٫۲۳	
Gd	۱٫۶۷	۰٫۵۴	-	۱٫۴۸	۱٫۹۹	۰٫۲۱	۵٫۵۲	-	
Tb	-	۱٫۱۳	-	-	-	-	۱٫۳۴	۰٫۸۴	
Dy	-	۲٫۳۳	-	-	-	۱٫۴۹	۲٫۹۸	۲٫۵۷	
Ho	۰٫۶۸	۰٫۱۰	-	۰٫۲۴	۰٫۳۲	-	۰٫۰۵	۰٫۷۶	
Er	-	۱٫۳۱	-	-	۰٫۰۶	۰٫۰۷	۰٫۵۸	۰٫۷۹	
Tm	-	-	-	-	-	-	-	-	
Yb	-	۰٫۵۲	۰٫۱۰	-	۰٫۳۹	۰٫۲۴	۱٫۰۴	۰٫۳۴	
Lu	-	۰٫۳۹	۰٫۰۶	۰٫۰۵	۰٫۰۷	۰٫۲۵	۰٫۱۶	-	
Se	-	-	۰٫۱۱	۰٫۰۴	۰٫۰۳	-	-	-	
Cs	۰٫۰۴	-	-	۰٫۰۸	-	۰٫۱۱	-	-	

[DOI: 10.61186/ijcm.32.2.301]

الگوی REE های بهنجار شده نسبت به کندریت [۲۱] برای اورانینیت‌های ناهنجاری ۲ ساغند در شکل ۵ ارائه شده است. ضریب تفکیک‌شدگی LREE/HREE در ایتریم اورانینیت‌های ناهنجاری ۲ ساغند برابر با ۰/۳۰ و در توریم این اورانینیت‌ها ۰/۱۳ است (جدول ۵). مقدار *Eu/Eu در اورانینیت‌های ایتریم‌دار ناهنجاری ۲ ساغند برابر با ۰/۰۷۳ و در اورانینیت‌های توریم‌دار ناهنجاری ۲ ساغند ۰/۰۰۲ است.

براساس شکل ۵، الگوهای توزیع عناصر خاکی نادر بهنجار شده نسبت به کندریت [۲۱] در کانسنگ اورانیوم و اورانینیت‌های ناهنجاری ۲ ساغند شبیه هستند و غنی‌شدگی از عناصر خاکی نادر سنگین و تهی‌شدگی از عناصر خاکی نادر سبک نشان می‌دهند. با توجه به این شباهت می‌توان نتیجه گرفت که کانی اصلی میزبان عناصر خاکی نادر اورانینیت است.

غلظت هر یک از REEها در اورانینیت از زیر حد آشکارسازی (برای Tb,Tm، Eu، Pr و La در برخی نمونه‌ها) تا حدود ۵/۵ درصد وزنی (Gd در برخی نمونه‌ها) تغییر می‌کند. مقدار ΣREE در اورانینیت‌های ناهنجاری ۲ ساغند بین ۸۷۵۰۰ تا ppm ۱۹۰۳۰۰ است. در دماهای بیش از ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد مانند ذخایر نفوذی و همزمان با دگرگونی، اتساع طبیعی ساختار اورانینیت اجازه حضور مقادیر زیادی از REEها را بدون تفکیک‌شدگی می‌دهد (ΣLREE/ΣHREE=1)، به‌طوری که منجر به الگوی مسطح REEها و یک ناهنجاری منفی بزرگ Eu که نشانگر تفکیک زودهنگام پلاژیوکلاز در مذاب سیلیکاتی برای ذخایر نفوذی است، می‌شود [۲۴، ۲۵]. در دماهای پایین‌تر از ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد، مقدار کل عناصر خاکی نادر کاهش می‌یابد و یک تفکیک‌شدگی بین REEها در اثر کنترل بلورنگاری ساختار کانی اورانینیت رخ می‌دهد (ΣLREE/ΣHREE≠1). در نتیجه، REEهای دارای شعاع یونی نزدیک به U^{+4} (Tb-Er) به‌طور ترجیحی وارد شبکه کانی اورانیوم شده و منجر به یک الگوی زنگی‌شکل برای REEها می‌شوند [۲۴]. همچنین ناهنجاری منفی Eu در ذخایر همزمان با دگرگونی و نوع رگه‌ای بیانگر شرایط احیایی در زمان نهشت اورانیوم و گویای دمای تشکیل بیش از ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد است [۲۴]. ضریب تفکیک‌شدگی ΣLREE/ΣHREE در کانی اورانینیت ناهنجاری ۲ ساغند کمتر از یک و برابر با ۰/۰۱ است. در شکل ۵، توزیع عناصر خاکی نادر سنگین الگوی تقریباً تخت و عناصر خاکی نادر سبک الگوی غیرتخت را نشان می‌دهند و یک ناهنجاری منفی آشکار از Eu نیز دیده می‌شود.



شکل ۵ مقایسه الگو توزیع عناصر خاکی نادر بهنجار شده نسبت به کندریت [۲۱] در کانسنگ اورانیوم و اورانینیت ناهنجاری ۲ ساغند

[DOI: 10.61186/ijcm.32.2.301]

الگوهای توزیع REEها در اورانینیت و کانسنگ اورانیوم ناهنجاری ۲ ساغند (شکل ۵) تفکیک‌شدگی مشخصی از عناصر خاکی نادر سبک نسبت به سنگین و ناهنجاری منفی Eu دارند که نشان می‌دهد که دمای تشکیل این کانسار نمی‌تواند بیش از ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد باشد. با توجه به ضریب تفکیک‌شدگی عناصر خاکی نادر (ΣLREE/ΣHREE=۰/۰۱)، ناهنجاری منفی Eu و الگوی توزیع عناصر خاکی نادر بهنجار شده نسبت به کندریت در کانسنگ اورانیوم و اورانینیت‌های ناهنجاری ۲ ساغند، به احتمال بسیار کانه‌زایی اورانیوم در کانسار ناهنجاری ۲ ساغند در گستره دمایی ۲۰۰ تا ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد رخ داده است.

برداشت

از بررسی‌های انجام شده در این پژوهش، نتایج زیر به دست آمد:

۱. کانه‌زایی اورانیوم در کانسار ناهنجاری ۲ ساغند همراه با کانه‌زایی مگنتیت و پیریت بوده است، به‌طوری‌که کانی اورانینیت کانی اصلی اورانیوم در این کانسار است. افزون بر این کانی‌ها، مولیبدنیت نیز به‌صورت جزئی در برخی از پهنه‌های کانی‌سازی حضور دارد. مقدار ΣREE+Y در کانسنگ اورانیوم ناهنجاری ۲ ساغند با عیار اورانیوم بین ۱۳۶۴ و ۴۷۶۴ppm، از ۳۰۴/۷۷ تا ۱۰۰۴/۸۵ppm تغییر می‌کند. مقدار ΣREE در اورانینیت‌های ناهنجاری ۲ ساغند ۸۷۵۰۰ تا ۱۹۰۳۰۰ ppm است.

۲. وجود ناهنجاری منفی Eu در کانسنگ اورانیوم و اورانینیت ناهنجاری ۲ ساغند و همچنین مقادیر قابل توجه عناصر خاکی نادر در اورانینیت نشان داد که دمای تشکیل آن بیش از ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد است. از سویی با توجه به تفکیک‌شدگی عناصر خاکی نادر سبک و سنگین در کانسنگ اورانیوم و اورانینیت ناهنجاری ۲ ساغند، دمای تشکیل این کانسار نمی‌تواند بیش از ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد باشد. از این رو، دمای تشکیل اورانینیت در ناهنجاری ۲ ساغند بین ۲۰۰ تا ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد است.

۳. گستره دمایی ۳۵۰-۲۰۰ درجه سانتی‌گراد برای تشکیل اورانینیت و غنی‌شدگی عناصر خاکی نادر سنگین در کانسنگ اورانیوم و اورانینیت ناهنجاری ۲ ساغند نشان داد که در این گستره دمایی، عناصر خاکی نادر (ترجیحاً عناصر خاکی نادر سنگین) وارد شبکه کانی اورانینیت شده‌اند. مقدار بالای عناصر Dy، Er، Lu، Tb، Tm، Y و Yb در کانسنگ اورانیوم و همبستگی مثبت شدید آنها با اورانیوم بیانگر غنی‌شدگی و ورود این عناصر همراه با اورانیوم در کانی اورانینیت است.

۴. مقایسه الگوی توزیع عناصر خاکی نادر بهنجار شده نسبت به کندریت در کانسنگ اورانیوم ناهنجاری ۲ ساغند با الگوهای جهانی نشان‌دهنده تشابه خاستگاه این ناهنجاری با کانسارهای اورانیوم نوع دگرنهادی است. همچنین الگوی توزیع عناصر خاکی نادر به‌هنجار شده نسبت به کندریت در کانسنگ اورانیوم ناهنجاری ۲ ساغند تشابه به نسبت خوبی با کانسارهای اورانیوم همزمان با دگرگونی نشان می‌دهد که این نوع کانسارها در ارتباط با محلول‌های گرمابی برآمده از مراحل اولیه دگرگونی به عنوان عامل انتقال اورانیوم هستند. از سویی، از آنجاکه الگوی توزیع عناصر خاکی نادر بهنجار شده نسبت به کندریت در اورانینیت ناهنجاری ۲ ساغند شبیه الگوی توزیع عناصر خاکی نادر در اورانینیت‌های نوع دگرنهادی است، می‌توان گفت که کانسار اورانیوم ناهنجاری ۲ ساغند، یک کانسار نوع دگرنهادی است.

قدردانی

نگارندگان از حمایت‌های مادی و معنوی پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای در به ثمر رسیدن این پژوهش تقدیر و تشکر می‌نمایند.

مراجع

[1] Ramezani J., Tucker R.D., "*The Saghand region, central Iran: U Pb geochronology, petrogenesis and implications for Gondwana tectonics*", American Journal of Science 303 (2003) 622-665.

[2] Ramdohr P. "*New observations on the ores of the Witwatersrand in South Africa and their genetic significance*", Geological Society of South Africa Transactions 16 (1958) 1-50.

[3] Mirzababaei G., Yazdi M., Rezvanianzadeh M.R., Behzadi M., Ghannadi M.M., "*Mineralization features of radioactive elements in Sehchahoon deposit based on spectroscopic, mineralogical and geochemical evidence*", Iranian Journal of Nuclear Science and Technology 40 (2019) 100-107 (in Persian).

[4] Khoshnoodi K., Ziapour S., Yazdi M., Cuney M., "*Mineralogy of various types of Th-U-REE mineralisation in the iron oxide – apatite deposits of the Bafq district, Central Iran*", Applied Earth Science 132 (2023) 1-15.

[DOI: 10.61186/ijcm.32.2.301]

[15] Forster H., Jafarzadeh A., "*The Bafq mining district in Central Iran: a highly mineralized Infracambrian volcanic field*", Economic Geology 89 (1994) 1697-1721.
[16] Jami M., Dunlop A.C., Cohen D.R., "*Fluid inclusion and stable isotope study of Esfordi apatite-magnetite deposit, Central Iran*", Economic Geology 102 (2007) 1111-1125.
[17] Moore F., Modabberi S., "*Origin of Choghart iron oxide deposit, Bafq District, Central Iran: New isotopic and geochemical evidence*", Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran 14 (2003) 259-269.
[18] Ziapour S., Esmaeily D., Khoshnoodi K., Niroomand S., Simon A., "*Mineralogy, geochemistry, and genesis of the Chahgaz (XIVA Anomaly) Kiruna-type iron oxide-apatite (IOA) deposit, Bafq district, Central Iran*", Ore Geology Reviews 128 (2021) 103924.
[19] Mirzababaei G., Yazdi M., Behzadi M., Rezvanianzadeh M., "*REE-Th mineralization in the Se-Chahun magnetite-apatite ore deposit, central Iran: Interplay of magmatic and metasomatic processes*", Ore Geology Reviews 139 (2021) 104426.
[20] Ziapour S., Esmaeily D., Khoshnoodi K., Niroomand S., "Mineralogy and geochemistry of thorium mineralization in the Chahgaz iron deposit, Bafq district, Central Iran", Iranian Journal of Nuclear Science and Technology 43 (2022) 80-87 (in Persian).
[21] Sun S.S., McDonough W.F., "*Chemical and isotopic systematic of oceanic basalt: implication for mantle composition and processes*", In: Saunders A.D., Norry M.J. (Eds.), Magmatism in the Ocean Basins, Journal of Geological Society of London, Special Publication 42 (1989) 313-345.
[22] Fryer B.J., Taylor R.P., "*Rare-earth element distributions in uraninites: Implications for ore genesis*", Chemical Geology 63 (1987) 101-108.
[23] Mclennan S.M., "*Rare earth elements in sedimentary rocks: Influence of provenance and sedimentary process*", Review of Mineralogy 21 (1989) 169-200.
[24] Mercadier J., Cuney M., Lach P., Boiron M.C., Bonhoure J., Richard A., Leisen M., Kister P., "*Origin of uranium deposits revealed by their rare earth element signature*", Terra Nova 23 (2011) 264-269.
[25] Cuney M., "*Evolution of uranium fractionation processes through time: driving the secular variation of uranium deposit types*", Economic Geology 105 (2010) 553-569.
[5] NISCO, "*A brief account of the Bafq iron ore region of central Iran*", National Iranian Steel Corporation (NISCO), Tehran, (1979) 149p (in Persian).
[6] Torab F.M., "*Geochemistry and metallogeny of magnetite- apatite deposits of the Bafq Mining District, Central Iran*", PhD Thesis, Clausthal University of Technology, Germany (2008) 144p.
[7] Beijing Research Institute, "*Final report on (1:2000) geological- geophysical survy in anomalies No. 1 and 2, Saghand District, Iran*", Beijing Research Institute of Uranium Geology China, (1992) 100p.
[8] Deymar S., Yazdi M., Rezvanianzadeh M. R., Behzadi M., "*Alkali metasomatism as a process for Ti-REE-Y-U-Th mineralization in the Saghand Anomaly 5, Central Iran: insights from geochemical, mineralogical, and stable isotope data*", Ore Geology Reviews 93 (2018) 308-336.
[9] Rajabi A., Canet C., Rastad E., Alfonso P., "*Basin evolution and stratigraphic correlation of sedimentary-exhalative Zn-Pb deposits of the Early Cambrian Zarigan-Chahmir basin, Central Iran*", Ore Geology Reviews 64 (2015) 328-353.
[10] Haghipour A., Pelissier G., "*Geology of the Saghand Sector*", In: Haghipour A., Valeh N., Pelissier G., Davoudzadeh M. (Eds.) Explanatory Text of the Ardekan Quadrangle Map, Geological Survey of Iran 8 (1977) 10-68.
[11] Samani B.A., "*Metallogeny of the Precambrian in Iran*", Precambrian Research 39 (1988) 85-106.
[12] Daliran F., "Kiruna-type iron oxidedistrict, Iran, with an emphasis on the REE geochemistry of their apatites", In: Porter T.M. (Ed.) Hydrothermal Iron Oxide Copper Gold and Related Deposits: A Global Perspective, PGC Publishing, Adelaide, Australia (2002) 303-320.
[13] Khoshnoodi K., Behzadi M., Gannadi M.M., Yazdi M., "*Alkali metasomatism and Th-REE mineralization in the Choghart deposit, Bafq district, Central Iran*", Geologia Croatica 70 (2017) 53-69.
[14] Khoshnoodi K., Yazdi M., Gannadi M.M., Ziapour S., Deymar S., Behzadi M., "*Formation and evolution of Th-REE mineralization fluids at the Kiruna-type Choghart iron oxide- apatite deposit, Central Iran: Insights from fluid inclusions and H-C-O isotopes*", Geological Journal 57 (2022) 2144-2159.